

Bestimmung der Temperaturkoeffizienten von Magnetometern

Peter Spitta, Institut für Geophysik der Universität Göttingen

1. Einleitung

Seit 1992 sind die Magnetometer der Firma MAGSON, die von V.Auster entwickelt worden sind und die die Variationen des Erdmagnetfeldes messen, auf dem Markt. Sie werden als Feldgeräte eingesetzt, dabei wird häufig der Sensor vergraben, um die täglichen Temperaturschwankungen zu verringern. Der Hersteller gibt für die Temperaturabhängigkeit der erdmagnetischen Komponenten X, Y und Z nur eine obere absolute Schranke von $1 \text{ nT/}^\circ\text{C}$ an. Wenn Auswertungen von sehr langen erdmagnetischen Perioden gemacht werden sollen, ist es nicht nur erforderlich, daß das Gerät möglichst drifffrei arbeitet, die interessierenden Perioden haben auch eine sehr kleine Amplitude, so daß sie nicht mit Sicherheit von möglichen Temperaturschwankungen unterschieden werden können. Deshalb wäre es wünschenswert, sowohl die Sensor- als auch die Elektroniktemperatur mitzuregistrieren, wenn die Temperaturkoeffizienten TK der Komponenten bekannt sind. In diesem Beitrag wird ein Verfahren beschrieben, wie man die TK's sowohl des Sensors als auch von der Elektronik ohne großen Aufwand bestimmen kann. Natürlich ist das Verfahren nicht auf MAGSON-Geräte beschränkt und kann beliebig abgewandelt werden.

2. Versuchsaufbau

Zur Bestimmung der TK's eines Magnetometers wird ein zweites benötigt, das entweder baugleich sein oder ähnliche Amplituden- und Phasenkurven haben sollte. Bei der Messung, über die in diesem Beitrag berichtet wird, wurden zwei Magnetometer der Firma MAGSON verglichen, die mit AU (=Auster) und GW(= Göttinger Wald) bezeichnet werden. GW registriert die erdmagnetischen Variationen im Göttinger Observatorium, das etwa 8 km östlich des Institutsgeländes in einer magnetisch ruhigen Umgebung liegt. Die TK's von AU sollen ermittelt werden. Da sich die Temperatur bei beiden Geräten nur langsam ändern wird, kann der Vergleich anhand von Minutenmittelwerten vorgenommen werden. Bei allen Aufbauten ist es selbstverständlich, daß beide Geräte sorgfältig horizontiert und nach Norden ausgerichtet worden sind.

V. Auster gibt in seiner Gerätebeschreibung für die TK's nur die schon genannte obere Schranke an, so daß die von einer Temperaturschwankung verursachten Ausschläge in der normalen Registrierung kaum zu sehen sein werden. Wenn aber die zwei Magnetometer nebeneinander stehen und ihre Skalenwerte so abgeglichen worden sind, daß in jeder Komponente X (oder Y oder Z) die jeweils gemessenen Feldwerte $X(t,T)$ zu jeder Zeit gleich sind, dann ist:

$$X_{\text{AU}}(t,T) = X_{\text{GW}}(t,T) + \text{const.}$$

(const = beliebige zeitlich konstante Größe). Wenn dann die beiden Magnetometer bei unverändertem Standort verschiedenen Temperaturfeldern ausgesetzt werden (indem ein Sensor oder Elektronik geheizt wird) und die Differenz der Amplitudenwerte in jeder Komponente gebildet wird, sollte in der Amplitudendifferenz der beiden Registrierungen für jeden

Zeitpunkt die von der Temperatur verursachten Schwankungen sichtbar sein, wenn die TK's der jeweiligen Komponente $\neq 0$ sind. Dabei ist es nicht erforderlich, auf magnetisch besonders ruhige Zeiten zu warten, solange $K_p < 5$ bleibt.

3. TK's des Sensors

Unter den Sensor von AU wird eine papierdünne Heizfolie aus Widerstandsmaterial mit einer Fläche von etwa 400 cm^2 gelegt. Sie muß mit Wechselstrom betrieben werden (Vermeidung von zusätzlichen Gleichfeldern). In unserem Versuch betrug die Heizleistung etwa 10 W. Der Sensor muß gegen Wärmeverlust geschützt werden. Dazu wird eine Wärmedämmung um den Sensor gelegt, der unter, über und an den Seiten möglichst keine Wärme entweichen läßt, wie z.B. einen aus Styroporplatten zusammengeklebten Kasten, auch die Verwendung von Verpackungsfolie mit eingeschlossenem Luftpolster in mehreren Lagen oder die Verwendung von Styroporschnitzeln ist möglich.

Jeder Sensor ist mit einem Temperaturfühler versehen, der die Messung der Sensortemperatur ermöglicht. Auster hat verschiedene IC's dafür verwendet, in unserem Magnetometer ist ein LM35 verwendet worden, der in Celsius geeicht ist und einen TK von $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ besitzt. Sein Ausgang ist an eine BNC-Buchse herausgeführt. Diesen Temperaturfühler kann man verwenden, um den Heizstrom zu steuern. Um die Schaltschwellen genauer einstellen zu können, wäre es vorteilhaft, diese Ausgangsspannung (250 mV bei 25°C) zehnfach zu verstärken, um auf einen Skalenwert von $100 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ zu kommen. Es ist ebenso möglich, eine kleine Brettschaltung für ein Temperaturmeßgerät zu bauen, Bauvorschläge findet man bei NÜRMAN (1980) oder bei TIETZE und SCHENK (1993). Eine solche Schaltung ist hier eingesetzt worden, der zusätzliche Temperaturfühler wurde in das Sensorgehäuse gesteckt.

Bei welcher Temperatur die Bestimmung der TK's durchgeführt wird, muß experimentell ermittelt werden: der untere Schaltpunkt sollte oberhalb der maximal vorkommenden natürlichen Temperatur vom Aufstellungsort liegen, der obere Schaltpunkt hängt von der Wärmedämmung ab: bei zu kleiner Heizleistung wird der obere Schaltpunkt nicht erreicht. Die Differenz zwischen oberem und unterem Schaltpunkt sollte nur wenige Grad betragen ($1 \dots 4^\circ\text{C}$). Um die Schaltpunkte festzulegen, wird die Ausgangsspannung des Temperaturmeßgerätes in einer weiteren Schaltung zwei Komparatoren für den oberen bzw. unteren Schaltpunkt zugeführt und mit fest eingestellten Spannungen verglichen (geeigneter IC: LM311 oder jeder Op-Amp ohne Gegenkopplung). Deren Ausgänge steuern über ein D-Flip-flop (z.B. CD4013) ein Relais. Solange die Temperaturspannung unterhalb der beiden Referenzspannungen bleibt, fließt über das Relais der Heizstrom und heizt den Sensor auf. Bei Erreichen der oberen Referenzspannung schaltet das Flip-flop um und schaltet das Relais ab, der Sensor kühlt wieder ab. Bei Unterschreiten der unteren Referenzspannung kippt die Schaltung und schaltet den Heizstrom wieder ein. Untere und obere Schranke kann man einstellen und damit die Temperaturänderung vorgeben. Damit erzeugt man eine von dem Temperaturschalter bewirkte Periodizität, die sowohl in Temperaturkurve als auch in den Differenzkurven der gemessenen Felder sichtbar und auswertbar ist. Äußere Temperaturschwankungen spielen keine Rolle mehr, da der Temperaturfühler sie ebenfalls registriert und die Heizleistung darauf einstellt. Im Mittel wird also der Sensor auf konstanter Temperatur gehalten. Das Magnetometer GW dient als Vergleichsinstrument, dessen Eigenschaften nicht geändert werden. Ein Beispiel einer derartigen Temperaturregistrierung, das auch angibt, in welchem Zeitraum (16. bis 23.10.2001) die Untersuchung stattfand, zeigt *Abb. 1*.

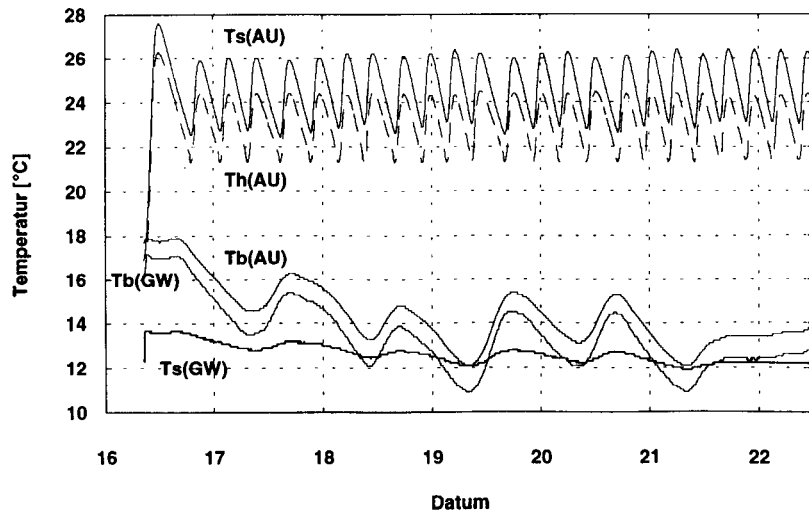


Abb. 1: Registrierte Temperaturen der beiden Magnetometer AU und GW: Temperatur der Heizung Th(AU), der Sensoren Ts(AU) und Ts(GW) und der Elektronik Tb(AU) und Tb(GW)

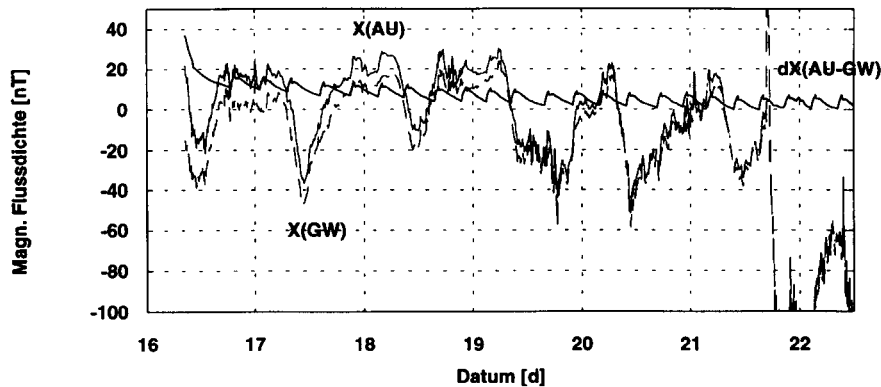


Abb. 2: Registrierungen der X-Komponente von AU und GW und deren Amplitudendifferenz dX

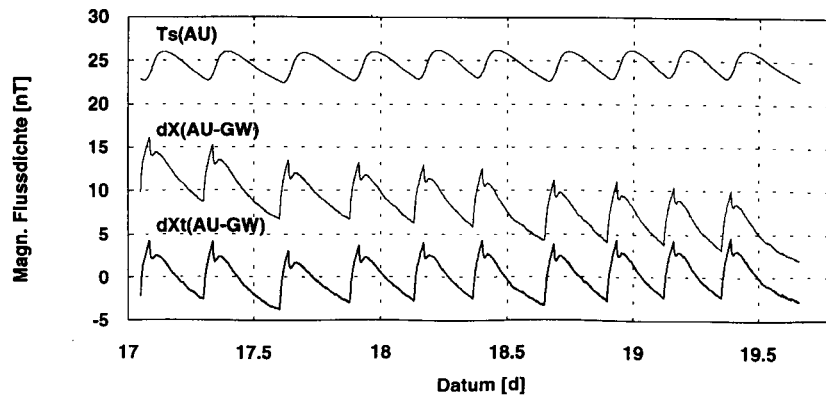


Abb. 3: Registrierung der Sensortemperatur Ts von AU, der Amplitudendifferenz dX und der driftkorrigierten Differenz dXt über 10 vollständige Heizperioden.

Abgebildet sind folgende Temperaturen als Zeitreihe: die Heiztemperatur $T_h(\text{AU})$, die von dem Temperaturschalter gesteuert wird, die Sensortemperatur $T_s(\text{AU})$ (beide zeigen die Periodizität der Heizzyklen), die Temperatur der Magnetometerelektronik $T_b(\text{AU})$ mit dem Tagesgang der Elektroniktemperatur, sowie die Temperaturen des Referenzmagnetometers GW $T_s(\text{Sensor})$ und $T_b(\text{Elektronik})$.

3.1 X-Komponente

Abb. 2 zeigt die Magnetfeldregistrierungen der beiden Magnetometer in der X-Komponente, sowie die Differenzkurve $dX(\text{AU-GW})$. Die durch die Heizung hervorgerufenen Variationen ist in der (durchgezogenen) $X(\text{AU})$ -Kurve nur sehr undeutlich, aber sehr deutlich in der Differenzkurve $dX(\text{AU-GW})$ zu sehen. Selbst im sehr gestörten Teil der Kurve (ab 21.10., ca 15 h, Kp 7+) ist sie noch brauchbar. Da für die Ermittlung des TK's zehn Heizperioden ausreichen, wird die Datenmenge auf zehn vollständige Perioden der Heizzyklen reduziert. Diese Differenzkurve $dX(\text{AU-GW})$ ist in *Abb. 3* dargestellt, dazu die Kurve der Sensortemperatur $T_s(\text{AU})$, mit der der TK des Sensors berechnet werden soll.

Es fällt auf, daß die Kurve $dX(\text{AU-GW})$ eine Drift zu kleineren Werte zeigt, die nicht von der im Mittel gleichen Temperatur im Sensor verursacht werden kann. Sie könnte mit einer Temperaturabhängigkeit von X in der Elektronik zusammenhängen (s. *Abb. 1* und Kap.4,). Da diese Drift aber die Abhängigkeit der X-Komponente von der Sensorheizung verfälscht, wird sie als linear in der Zeit in dem zu untersuchten Zeitintervall angenommen. Die Drift beträgt

für die X-Komponente: -2.82 nT/d , Korrelation: -0.78

(d = Tag). Die so korrigierte Kurve $dX_t(\text{AU-GW})$ ist in *Abb. 3* ebenfalls zu sehen, mit diesen Daten wird die weitere Berechnung durchgeführt.

Abb. 4 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der *Abb. 3*, der nur eine der Heizperioden umfaßt. Man erkennt deutlich, daß das Aufheizen (aufsteigender Ast in der T_s -Kurve) in der X-Komponente (dargestellt in der dX_t -Kurve) keineswegs linear verläuft, auch nach dem Abschalten der Heizung dauert es eine Weile, bis sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur T_s und dX_t erkennen läßt. Erst von diesem Zeitpunkt ab wird eine lineare Regression zwischen dX_t und T_s berechenbar, sie wird als Regressionsgerade in *Abb. 5* dargestellt. Das Aufheizen des Sensors wird also wegen zu undurchsichtigem Kurvenverlauf nicht ausgewertet.

Dieses Verfahren wird für alle zehn Heizperioden analog angewandt und jeweils eine Regressionsgerade berechnet. Der Mittelwert der Steigung dieser Geraden ist der gesuchte Temperaturkoeffizient. Der Zeitpunkt, an dem die Berechnung jeweils beginnt, ist nicht frei von Willkür, das beeinflußt auch den Fehler:

$$\text{TK}(X) = 1.17 \pm 0.08 \text{ nT/}^\circ\text{C}$$

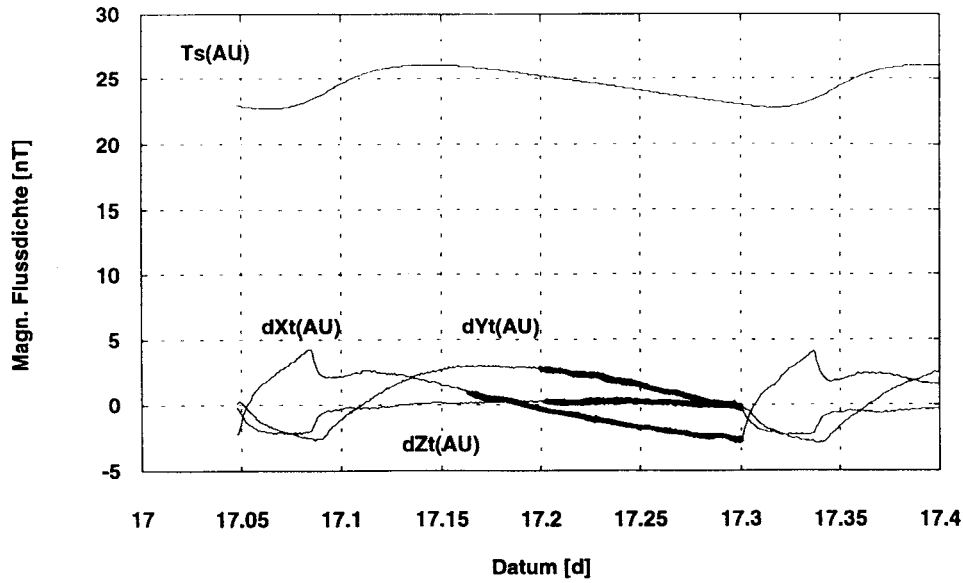


Abb. 4: Vergrößerte Ansicht nur einer Periode der Abb. 3 mit den driftkorrigierten Kurven der X-, Y- und Z-Differenzen

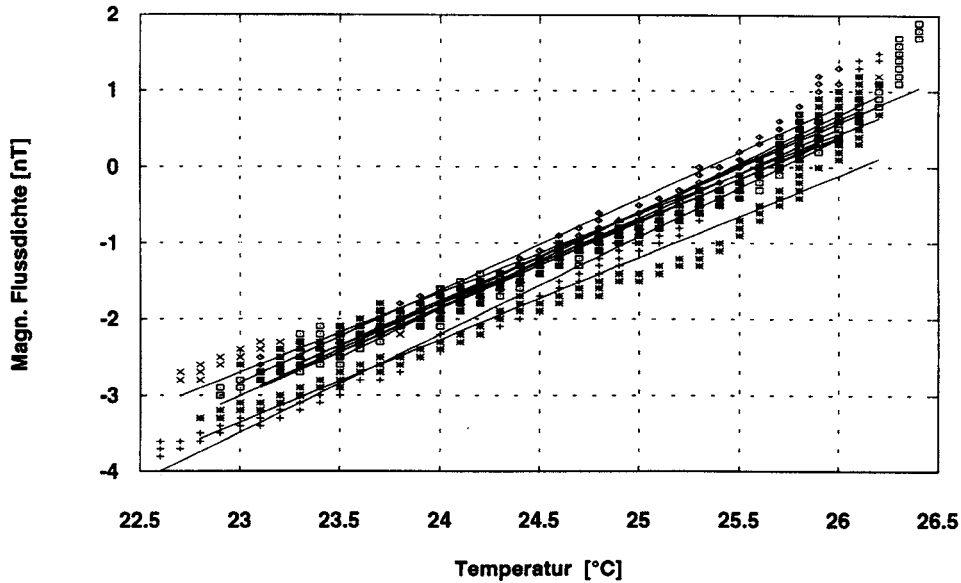


Abb. 5: Regressionsgeraden zwischen X-Differenzen beim Abkühlen und den gleichzeitigen Sensortemperaturen T_s bei jeder einzelnen Periode

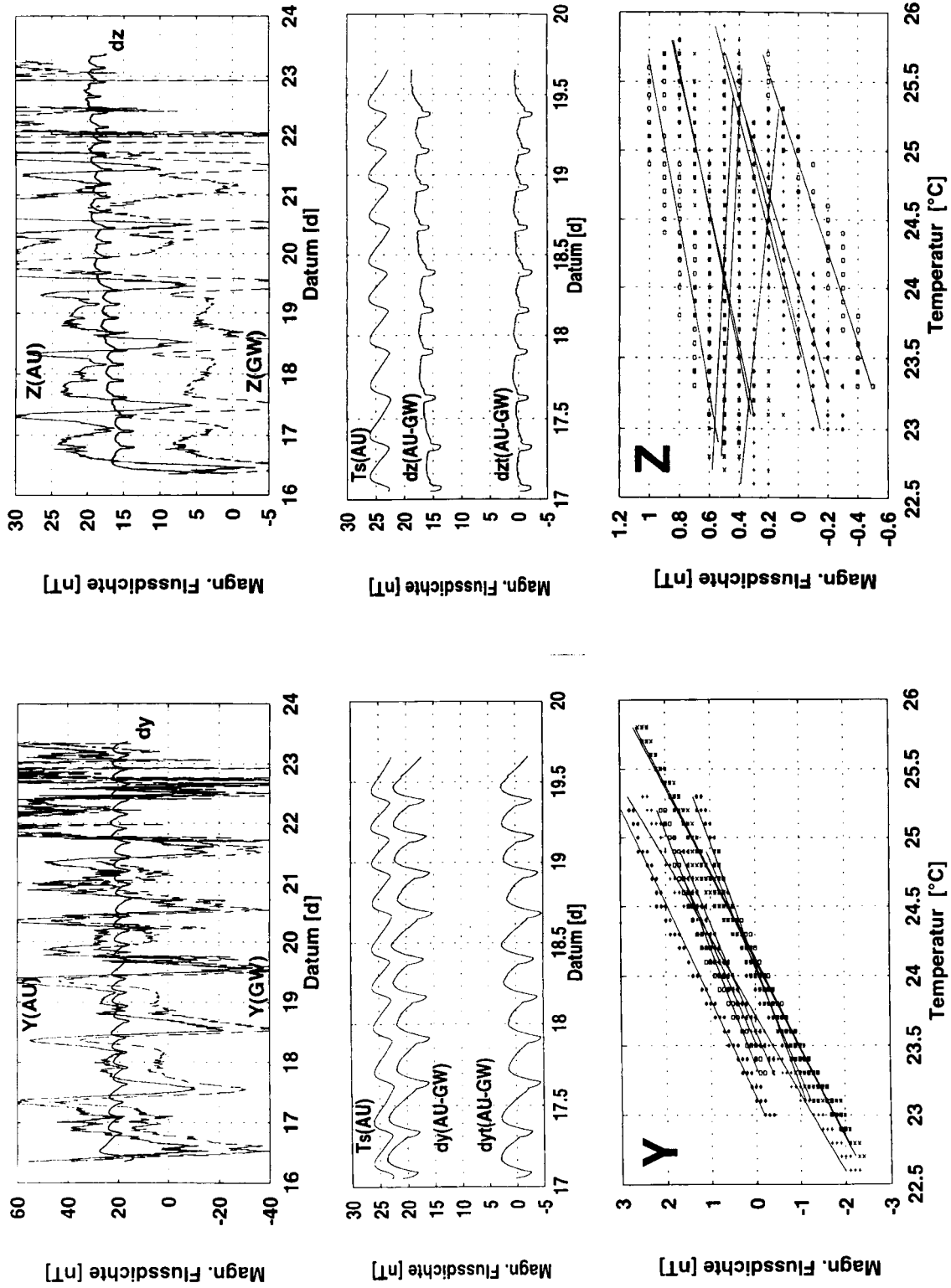


Abb. 6: Bestimmung der Temperaturkoeffizienten bei den Komponenten Y und Z

3.2 TK der Y- und Z-Komponenten

Die Bestimmung der TK's der Y- bzw. der Z-Komponenten verläuft analog zu der X-Komponente, sie wird also nur stichwortartig angedeutet und nur, wo sich Unterschiede ergeben, weiter ausgeführt, auch die zeichnerische Darstellung in *Abb. 6* wird sehr verkleinert und zusammengefaßt. Auch hier werden die Differenzkurven berechnet, das gleiche Zeitintervall für die Auswertung ausgewählt und die Drift berechnet. Die Drift beträgt

für die Y-Komponente: -0.48 nT/d , Korrelation: -0.18

für die Z-Komponente: 0.93 nT/d , Korrelation: 0.66

Diese Drift wurde jeweils bei den Kurven berücksichtigt, das Ergebnis sind die Kurven dY_t bzw. dZ_t , die für die weiteren Rechnungen benutzt werden.

Einen vergrößerten Ausschnitt von dY_t und dZ_t vom Umfang nur einer Periode zeigt die schon vorgestellte *Abb. 4*. Offenbar heizt sich das Spulensystem von Y erheblich langsamer auf und erreicht erst lange nach dem Abschalten des Stromes sein Maximum. Dementsprechend ist das lineare Kurvenstück für die Auswertung auch kürzer, der Fehler dadurch größer. In der Abbildung kaum zu sehen ist die Abweichung der Z-Komponente dZ_t von einer Horizontalen, nur bei einer großen Vergrößerung (z.B. auf einem Monitor) ist ein Knickpunkt im Kurvenverlauf erkennbar; erst von diesem Knickpunkt ab wurde die lineare Beziehung zwischen dZ_t und T_s benutzt. Die Temperaturkoeffizienten sind die Mittelwerte der Steigungen der Regressionsgeraden:

$$TK(Y) = 1.42 \pm 0.20 \text{ nT}^\circ\text{C}$$

$$TK(Z) = 0.14 \pm 0.15 \text{ nT}^\circ\text{C}$$

Bei der Z-Komponente hat der Fehler der Messung die gleiche Größenordnung wie der TK, beide sind sehr klein. Die Messung der TK's bei diesem Gerät hat gezeigt, daß die TK's der X- und Y-Komponenten im Sensor deutlich größer sind als von Auster angegeben, nur bei Z ist er vernachlässigbar.

4. TK der Elektronik

Die Bestimmung der TK's der Elektronik verläuft ganz analog wie beim Sensor: die Heizfolie wird unter den Montagerahmen gelegt. Da aber die Magnetometerelektronik im gleichen Rahmen bzw. Gehäuse wie der Datenlogger untergebracht ist, kann man nicht unterscheiden, welchen Einfluß sowohl die Magnetometerelektronik und als auch der Datenlogger auf den TK hat. Es wird also ein gemeinschaftlicher TK für jede Komponente ermittelt. Auch hier kann der eingebaute Temperaturfühler zur Heizungssteuerung verwendet werden, oder ein externer Temperaturfühler wird in das Gehäuse eingeführt, wie hier geschehen. Wie beim Sensor müssen beim Temperaturschalter die oberen und unteren Schaltpunkte gesetzt und das Gehäuse der Elektronik gegen Wärmeverluste geschützt werden. Die Registrierung lief vom 4. bis 6.12.2001, der maximale Störungsgrad betrug $K_p 4.0$.

Abb. 7 (links) zeigt die Zeitreihe der X-Komponenten $X(\text{AU} - \text{durchgezogen})$ und $X(\text{GW} - \text{gestrichelt})$, dazu die Registrierkurve der Elektroniktemperatur $T_b(\text{AU})$, die eine schön gleichmäßige Heizperiode zeigt, die vom Temperaturschalter gesteuert worden ist. Diese Periode sollte auch in der Registrierung von $X(\text{AU})$ wiederzufinden sein. Durch Bildung der Differenz $dX(\text{AU}-\text{GW})$ und Beschränkung auf 4 vollständige Heizperioden erhält man die

Abb. 7 (rechts), die zur weiteren Auswertung herangezogen wird. Die Berechnung der Regressionsgeraden zwischen dX und T_b ergibt den TK der X-Elektronik:

$$\text{TK(X-Elektr)} = - 0.20 \text{ nT}^\circ\text{C}, \text{ Korrelation : } - 0.75$$

Abb 8 (oben) zeigt die Meßpunkte und die daraus berechnete Gerade.

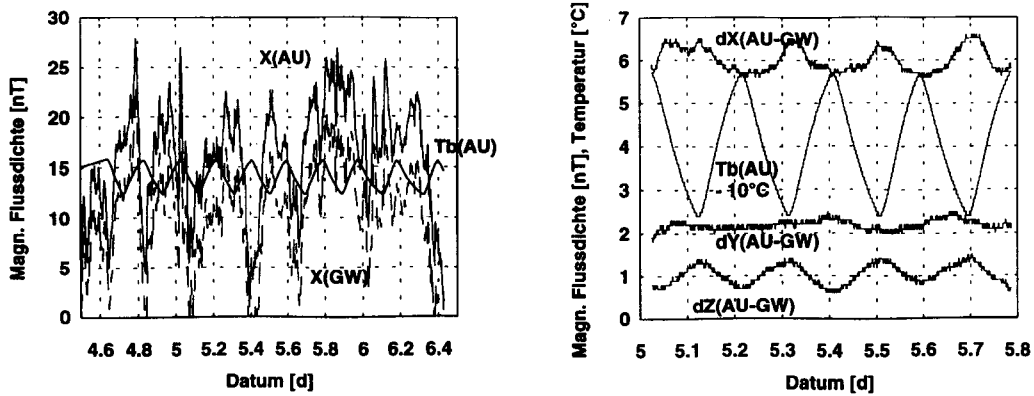


Abb. 7: Registrierung der X-Komponenten der beiden Magnetometer AU und GW und der Elektroniktemperatur Tb von AU (links) und (rechts) der Amplitudendifferenzen dX, dY und dZ über 4 vollständige Heizperioden

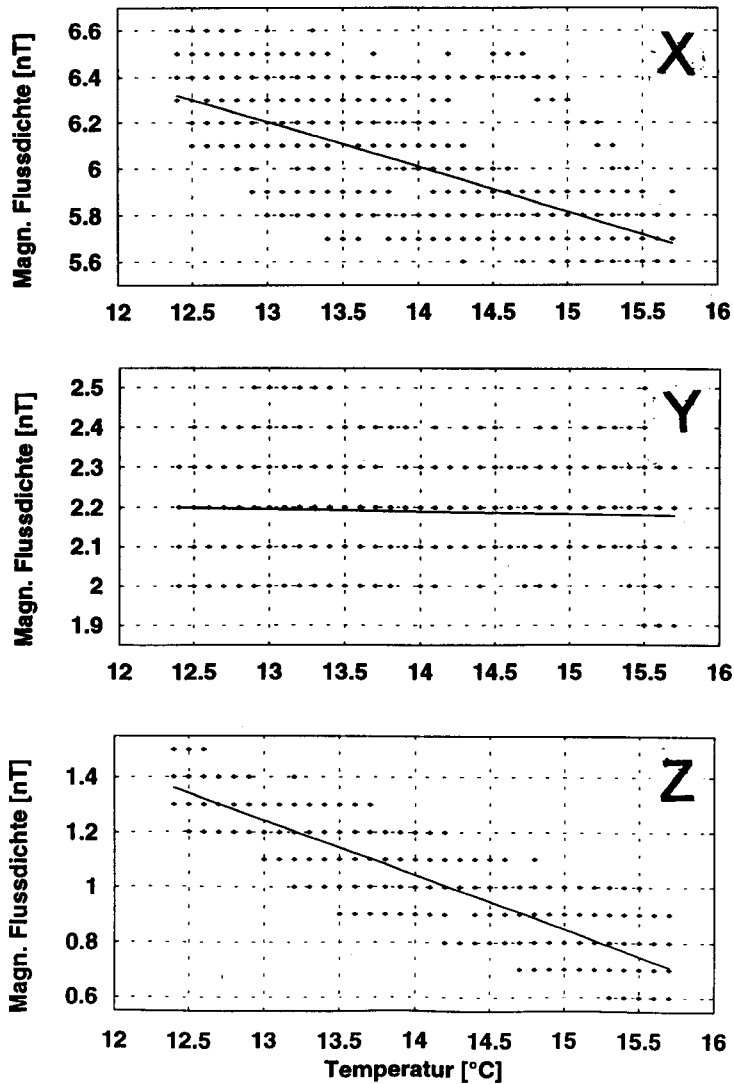


Abb. 8: Regressionsgeraden zwischen der Amplitudendifferenz dX (oben), dY (Mitte) und dZ (unten) und der Elektroniktemperatur Tb(AU)

In *Abb 7* (rechts) sind auch die Differenzkurven von $dY(AU-GW)$ und $dZ(AU-GW)$ abgebildet. Man sieht bei dY kaum eine Andeutung der Heizperioden, dementsprechend klein ist der TK (*Abb. 8 - Mitte*):

$$TK(Y\text{-Elektr}) = -0.01 \text{ nT/}^\circ\text{C, Korrelation: } -0.01$$

Die Kurve mit der besten Widerspiegelung der Heizperiode zeigt dZ : (*Abb. 8 - unten*)

$$TK(Z\text{-Elektr}) = -0.20 \text{ nT/}^\circ\text{C, Korrelation: } -92$$

5. Schlußfolgerung

Da die elektronische Schaltung bei allen drei Komponenten gleich aufgebaut ist, wäre bei gleichem Betriebszustand und gleicher Verstärkung ein gleicher TK bei allen drei Komponenten zu erwarten gewesen. Die Unterschiede in den Komponenten liegen aber in den Strömen: Jede Komponente benötigt unterschiedliche Kompensationsströme, um die unterschiedlichen Erdfeldkomponenten kompensieren zu können, da die Fluxgate-Sensoren im Nullfeld betrieben werden. So muß bei der Z-Komponente in Mitteleuropa etwa $44 \mu\text{T}$ kompensiert werden, bei X nur $19 \mu\text{T}$, während Y ohne Kompensationsströme auskommt. Betrachtet man dagegen die TK's von X und Z, so erkennt man, daß der Zahlenwert bei X und Z der gleiche, aber die Streuung bei X erheblich größer ist, während der TK von Y fast null ist, er verschwindet ganz in der Streuung. Vermutlich hängen die TK's und die Kompensationsströme zusammen.

Ob diese TK's auf andere baugleiche Magnetometer übertragen werden können, ist noch völlig offen, bisher ist diese Untersuchung mit nur einem Gerät durchgeführt worden. Wie in diesem Beitrag gezeigt wurde, ist der Aufwand zur Bestimmung nicht groß, und ein magnetisch ruhiges Plätzchen findet man fast überall.

Sensor und Elektronik/Aufzeichnungseinheit werden unterschiedlichen Temperaturfeldern ausgesetzt. Es wäre sehr empfehlenswert, die Sensor- und die Elektroniktemperatur mitzuregistrieren, da auch im Registrierraum erhebliche Temperaturschwankungen auftreten können und die TK's nicht null sind. Anhand der Temperaturkurven könnte man leichter entscheiden, ob die Temperatureinflüsse berücksichtigt werden sollten, oder ob man sie vernachlässigen kann. Der Datenlogger von STEVELING (1994, 1996) z. B. bietet eine sehr komfortable Möglichkeit, Minutenmittelwerte aller registrierten Komponenten und parallel dazu die beiden Temperaturen mitzuregistrieren, indem man bei den Aufzeichnungsparametern in der Zeile der Taktrate statt einer Null in der ersten Stelle ein Plus einfügt (persönliche Mitteilung, diese Option ist ab Version 2.21 vorhanden, aber nicht im Handbuch erwähnt). Die Speicherkapazität vermindert sich nur minimal: eine Zeile zusätzlich pro Minute.

6. Danksagung

Für die Möglichkeit, diese Untersuchung im Institut für Geophysik in Göttingen durchführen zu können, danke ich der Institutsleitung. Besonderer Dank geht aber an meine Mitarbeiter:

Prof. Dr. Ulrich Schmucker für viele fruchtbare Diskussionen,
Wilfried Streinhoff für feinmechanische Hilfe und die Heizfolie,
Martin Leven für elektronische Betreuung,
Erich Steveling für Software

7. Literatur

Nürmann, D.: Tips und Schliche. RPB-Elektronik-Taschenbücher Band Nr.129, Franzis-Verlag GmbH, München, 1980

Tietze, U. und Ch. Schenk: Halbleiter-Schaltungstechnik, 10. Auflage
Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 1993

Steveling, E.: Erweiterung des aus MAGSON-Magnetometer und RAP-Datenlogger bestehenden Meßsystems

in: Bahr, K. und A. Junge (Hrsgb), Prot. 16. Koll. "Elektromagnetische Tiefenforschung", Burg Ludwigstein, 09. - 12.04.1996, S.173-178.

Steveling, E. und M. Leven: Stand der RAP-Geräteentwicklung

in: Bahr, K. und A. Junge (Hrsgb), Prot. 15. Koll. "Elektromagnetische Tiefenforschung", Höchst im Odenwald, 28. - 31.03.1994, S.431-438